干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2003—2018年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征

王丽平[1,2]， 段四波[2]， 张霄羽[1]， 于艳茹[2]

（1. 山西大学环境与资源学院，山西 太原 030006；2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081）

摘 要： 中国幅员辽阔、气候差异大、人口众多，在全球气候变化背景下研究中国的气候变化对维护中国乃至世界的粮食安全以及社会经济持续稳定发展具有十分重要的意义。地表温度最大值可避免云雨天气对热红外遥感获取地表温度准确数据的干扰，且年变化较为稳定，但对重大土地利用转移、干旱热浪等高度敏锐。基于2003—2018年MODIS（Moderate resolution imaging spectroradiometer）地表温度产品，采用气候倾向率、线性相关系数等研究方法分析了中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征。结果表明：(1) 中国地表温度年最大值呈现北高南低的空间分布特征，中国地表温度年最大值的最高值位于新疆吐鲁番盆地。(2) 地表温度年最大值的空间分布按中国气候区划分区分析表明，温带大陆性气候区地表温度年最大值最高，温带季风气候区的值较高，高原山地气候区、亚热带季风气候区、热带季风气候区的值较低，地表温度年最大值的空间分布格局与地表覆盖类型相关。(3) 2003—2018年，中国地表温度年最大值的时间变化特征总体表现为微弱降温趋势，气候倾向率为$-0.06\ K\cdot(10a)^{-1}$，降温区域占全国总面积的50.45%。(4) 气候倾向率在空间上表现为西高东低，西部升温趋势比东部更加明显。部分区域表现为显著降温趋势，如北方中部、华南区域、塔里木盆地边缘等，这些区域的降温与植被覆盖变化有关。

关 键 词： 地表温度年最大值；时间序列；时空变化；MODIS数据

文章编号：

中国位于亚欧大陆东部，太平洋西部，幅员辽阔，东西跨度大，南北纬度差异也很悬殊，再加上水陆热力差异，中国的气候差异很大。近些年，在全球气候变化的背景下，研究中国气候变化具有十分重要的意义。地表温度（Land surface temperature，LST）是地-气界面长波辐射和湍流热流交换的直接驱动力，是地表能量和水量平衡物理过程中最重要的参数之一[1-3]，已被美国宇航局和其他国际组织确定为地球系统最重要的数据之一，是各种气候、水文、生态、生物物理和生物地球化学研究的关键变量[4]。国内外学者利用地表温度对气候变化研究提供理论支持，Mao等[5]对地表温度均值进行了长时间序列分析，Susskind等[6]分析地表温度的多年变化以及全球地表温度热异常。

很多关于全球气候的研究都是基于气象站点数据[7]。卫星反演的地表温度和近地表大气温度并不相同，由于大气导热性弱的原因，大气升温比地表要慢得多[8]。同时，地面站点是基于点进行观测，而选取的点对结果有很大影响。由于极端气候地区气象站的短缺以及维护的困难性，地面站点分布并不均匀，这也增加了地面站点温度应用时的误差[9-10]。研究表明气象站点的温度和卫星反演的地表温度不尽相同，与气温相比地表温度与土地表面的生物物理特征（如土地覆盖类型、植被密度和能

收稿日期： 2020-08-18； **修订日期：** 2021-04-06
基金项目： 国家重点研发计划（2018YFB0504800）
作者简介： 王丽平（1995-），女，硕士研究生，主要从事定量遥感研究. E-mail: wlpn123@163.com
通讯作者： 段四波（1983-），男，副高级，主要从事定量热红外遥感研究. E-mail: duansibo@caas.cn

量通量)的关系更为密切[11]。

热红外反演地表温度最早可追溯到1970s[12]。为了提高反演精度,许多研究提出不同地表温度反演算法以降低各种因素的影响,比如发射率和大气的影响等[13]。MODIS(Moderate resolution imaging spectroradiometer)地表温度数据产品包括3种算法:广义分裂窗算法[14]、日夜算法[15]以及温度和比辐射率分离算法。利用这些算法,我们将获得更精确的地表温度数据。这些数据产品将有助于我们深入理解全球陆地、海洋和低层大气内的动态变化过程,分析中国地表温度长时间序列变化趋势,为中国气候变化提供理论支持。

众多研究表明MODIS Aqua卫星获取的地表温度最大值具有独特的、更加丰富的数据信息,区别于一般地表温度数据,该数据对重大土地利用转移、热浪、干旱以及植被信息高度敏锐[16]。卫星获得的连续地表温度受到天气变化(风速、云量、湿度等)的影响具有很高的自然变异性[17-18]。尽管地表温度通常表现出较大的时空差异[19-20],但地表温度年最大值突出体现了与极端气候事件和重大土地覆盖变化的相关性。对于一个特定的区域,在土地覆盖类型没有发生变化的情况下,地表温度最大值的年际变化相对稳定[6]。Mildrexler等[16]针对地表温度年最大值的特殊性质分析其与热浪、干旱及冰层融化之间的相关性,并没有对地表温度年最大值的时间序列进行分析。Mao等[5]等对地表温度均值进行了长时间序列分析,但由于数据量较大给研究带来了困难。

本文采用MODIS地表温度数据产品MYD11A1提取地表温度年最大值,分析2003—2018年16 a间中国地表温度年最大值时空分布及变化特征。选取数据质量最好的数据获取地表温度年最大值,将很好地避免数据缺失的问题,为长时间序列研究提供可靠的数据支持。同时这将有助于获取不同于其他地表温度研究的时空特征,为16 a间中国地表温度时空变化特征提供依据,有助于更好地理解中国地气相互作用及其气候效应。

1 数据与方法

1.1 数据

美国宇航局NASA发射了2颗极轨地球观测系统(Earth observation system, EOS)卫星(Terra和Aqua)。Terra卫星于1999年发射,在当地时间上午10:30和晚上10:30从北到南穿过赤道,称为上午星。Aqua卫星于2002年发射,在凌晨01:30和下午01:30从南到北穿过赤道,称为下午星。MODIS搭载在Terra和Aqua上,是美国地球观测系统中用于观测全球生物物理过程的重要仪器。

由于Aqua的过境时间为下午01:30,接近一天中地表温度最大值时间。其次,Aqua卫星于2002年发射,能够满足对中国地表温度年最大值长时间序列研究的要求。本研究采用MODIS/Aqua地表温度数据产品MYD11A1。MYD11A1数据可在NASA官方数据网站进行下载(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov)。该数据是最新地表温度V006版本,采用广义分裂窗算法获取地表温度,消除了大气影响。数据集中包含白天地表温度数据(LST_Day_1km)、夜间地表温度数据(LST_Night_1km)以及对应质量控制数据(QC_Day、QC_Night)等,空间分辨率为1 km,时间分辨率为1 d。数据的预处理包括从科学数据集中提取白天地表温度数据以及相应的白天质量控制数据,经过投影、数据格式的转换后将计数值通过系数转换得到实际地表温度数据。利用QC_day数据选取晴空条件下地表温度,所选取的地表温度数据发射率平均误差小于0.01,地表温度误差小于1 K。对选取地表温度年最大值最高值以该像元为中心,3 km×3 km为移动窗口检索QC数据,移动窗口中有60%的值为0或者8则视为有效数据。

地表覆盖类型数据采用的是MODIS产品MCD12Q1的2018年数据,其土地覆盖数据产品包含多个分类方案,本研究提取MCD12Q1数据产品中的国际生物圈计划分类数据MCD12Q1 LC_Type1,其空间分辨率为500 m,为匹配地表温度数据将数据聚合为1 km。地表覆盖数据将有助于更好地理解地表覆盖对地表温度与其他因子之间的影响机制。

植被数据采用的是MODIS植被指数产品MYD13A3。该数据集中提供归一化植被指数(Normalized differential vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI),以及质量信息等。MYD13A3 NDVI数据,空间分辨率是1 km,时间分辨率为1个月。本研究选取中国区域的NDVI数据产品,以获取植被对地表温度年最大值

影响的定量化研究。

除上述数据外，中国气候区划分区矢量数据也被用于辅助分析地表温度年最大值的时空分布特征。由于太阳辐射分布的纬度差异而产生的纬度地带性（气候随纬度变化）、海陆分布而产生的经度地带性（气候随经度变化）以及随山地海拔高度增加产生的垂直地带性（气候随海拔高度变化）都对气候分区产生影响。根据平均气温、积温、平均降水量等气候因子在黄秉维农业自然区划的基础上对中国农业气候合并分区，中国农业气候区划数据可在中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/）下载。该数据将中国分为温带大陆性气候区、温带季风气候区、高原山地气候区、亚热带季风气候区以及热带季风气候区（图1）。

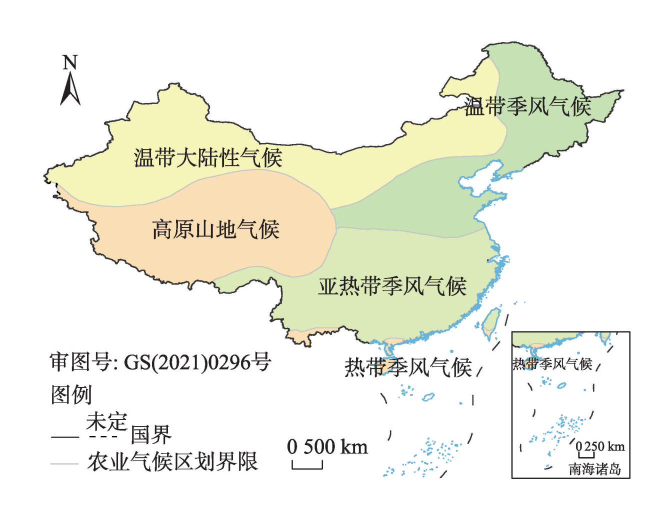


图1　中国农业气候区划

Fig. 1　Climatic zoning of China

1.2　研究方法

1.2.1　地表温度年最大值获取方法　地表温度年最大值：通过选取晴天条件下（即质量控制数据为0或8）地表温度的年内最大值获取。方法如下式所示：

$$LST_{max} = \max(LST) \tag{1}$$

式中：LST_{max}为地表温度年最大值（K）；LST是晴天条件下的地表温度日数据（K）。本研究中为MODIS/Aqua下午01:30时刻的地表温度数据。

1.2.2　地表温度年最大值时间序列趋势分析方法

气候倾向率[21]：该方法可以显示气候要素的时间变化趋势，利用气象要素数据以及时间序列得到简单的线性回归方程，分析气象要素随时间的变化。

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X \tag{2}$$

式中：X为时间序列，本研究中为16 a（2003—2018年）；Y为气象要素，本研究为2003—2018年地表温度年最大值；β_1为线性回归方程的截距；β_2为线性回归系数，把$\beta_2 \times 10$称为气候倾向率，其单位为$K \cdot (10a)^{-1}$。β_1、β_2采用最小二乘法计算使Y残差最小，计算公式如下：

$$\beta_1 = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \tag{3}$$

$$\beta_2 = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \tag{4}$$

式中：x_i为第i年时间序列；y_i为第i年地表温度年最大值（K），回归系数的符号表示变量的线性趋势；n为年份总数，文中为16（2003—2018年）。若$\beta_2 > 0$，表示地表温度年最大值随时间递增，若$\beta_2 < 0$，表示地表温度年最大值随时间递减，气候倾向率的绝对值越大其趋势越明显。

线性相关系数（r）：在本研究中用来检验地表温度年最大值在时间序列波动情况的显著性。计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}} \tag{5}$$

式中：y_i为第i年地表温度年最大值（K）；$\bar{y}$为时间序列地表温度年最大值的平均值（K）；x_i为第几则表明地表温度年最大值时间序列具有i年时间；$\bar{x}$为时间均值；n为年份总数，文中为16（2003—2018年）。r值通过显著性检验则显著波动，反之，则表明地表温度年最大值时间序列波动并不显著。

2　结果与分析

2.1　地表温度年最大值时空分布特征

2.1.1　地表温度年最大值分析　本文利用中国气候区划分区对地表温度年最大值的空间分布特征进行了分析，图2显示了2003—2018年中国地表温度年最大值的多年最高值的空间分布情况。由图可见，中国西北地区地表温度年最大值最高，其次为北方地区，而南方地区以及青藏高原区地表温度年最大值都较低。其中西北地区地表温度最大值最高与周围地区形成鲜明的对比，这是由于西北地区

图2　2003—2018年中国地表温度(LST)年最大值的多年最高值合成图

Fig. 2　Composite chart of multi-year maximum annual surface temperature in China during 2003—2018

高大山脉的阻挡,水汽量很少,再加上西北云量较少,吸收太阳长波辐射比较强烈,这些都使得西北地表温度年最大值较大。其次内蒙古地区值也较高,这是由于该地区与西北地区地理环境相近。而南方地区由于降水较多、云量较大造成一定的数据缺失,加之地表植被覆盖度较大,改变了下垫面的性质,使得地表温度年最大值较低。整体来说地表温度年最大值在空间上的分布特征为:由南向北随纬度升高而增大,由西北向东南随降水量增加而递减。

区域尺度上地表温度年最大值高值在西北地区,由图2可知沙漠地区地表温度年最大值较高,但是全国地表温度年最大值的最高值位置以及年际变化之前研究较少提及。本研究发现地表温度年最大值的最高值区域位于中国吐鲁番盆地,是新疆天山东部南坡的一个山间盆地。从吐鲁番盆地2003—2018年地表温度年最大值的年际变化(图3)来看,该区域在研究期内地表温度年最大值均在75 ℃以上,2015年最大为351.8 K,约为78.7 ℃。这是由于吐鲁番盆地是典型的地堑盆地,也是中国地势最低的地方,平均海拔-156 m,再加上该地身居大陆内部,远离海洋,属于温带大陆性气候,这些都使得这里气候炎热干燥。吐鲁番盆地是中国热极,这与气象数据一致,据气象站记录吐鲁番盆地夏季最高气温为49.6 ℃,是中国夏季最热的地方[22]。

2.1.2　地表温度年最大值区域分析　地形地貌、降水以及经纬度位置等因素都对地表温度有一定影响,因此根据中国气候区划将中国分为热带季风气候区、亚热带季风气候区、高原山地气候区、温带季风气候区以及温带大陆性气候区5个气候区(图1),进而对中国地表温度年最大值进行分区分析。

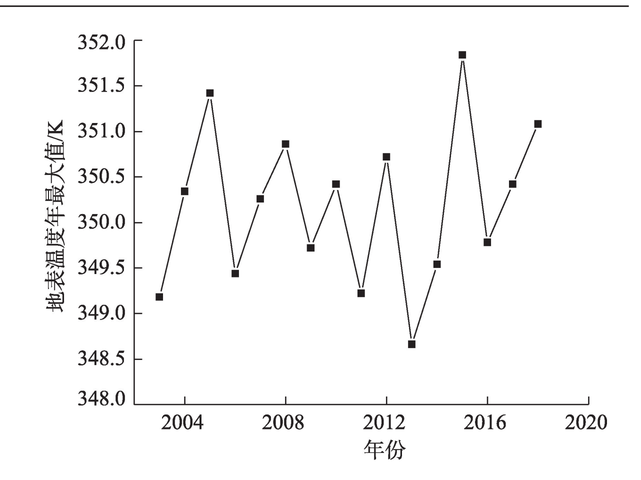
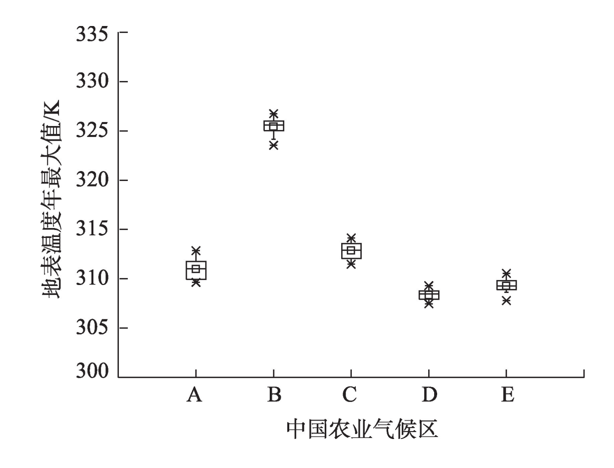


图3　2003—2018年吐鲁番盆地地表温度年最大值

Fig. 3　Annual maximum surface temperature in Turpan Basin during 2003—2018

由各气候区地表温度年最大值的四分位图(图4)可见,5个气候分区中,温带大陆性气候地表温度年最大值最高,均值为328.7 K;温带季风气候区次之,均值为317.2 K;高原山地气候、亚热带季风气候区、热带季风气候区地表温度较低,均值在312.0 K左右,差异较小。首先,这是由于中国大陆夏季南北温度差异较小,其次地表覆盖类型对地表温度有一定影响,地表覆盖改变了下垫面的反照率、蒸散发等物理过程和碳循环、温室气体排放等化学过



注:A为高原山地气候区,B为温带大陆性气候区,C为温带季风气候区,D为亚热带季风气候区,E为热带季风气候区。下同。

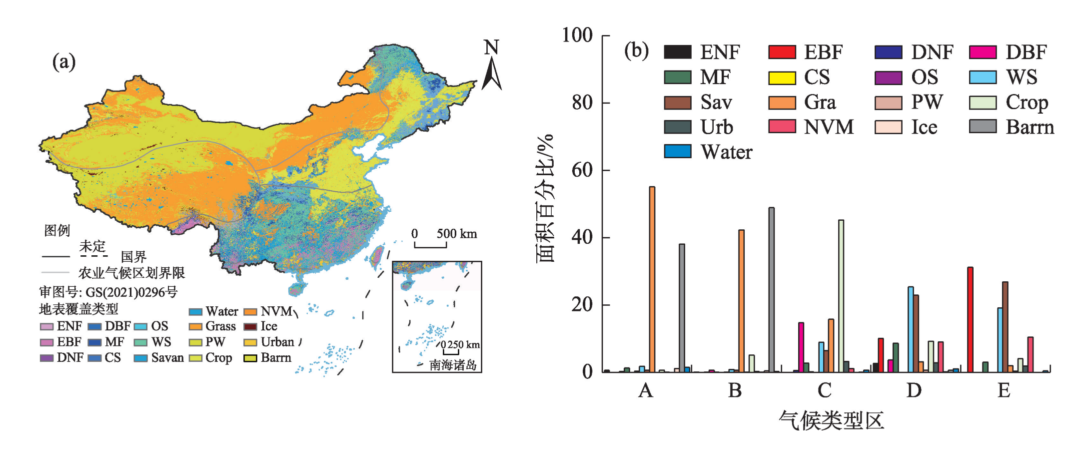
图4　各气候区地表温度年最大值的四分位图

Fig. 4　Quarter-dimensional map of the annual maximum surface temperature in each climatic region

程，以致在不同时空尺度上，对局地、区域和全球尺度的气候产生影响。中国西北地区地表覆盖大多为裸土和草地，而其他地区植被覆盖率较大，地表覆盖类型差异较大（图5a）。本文中温带大陆性气候区地表温度年最大值最高，由图5b可知，其地表覆盖类型主要是裸地，植被覆盖比较低，由于植被蒸散发、太阳辐射强烈等原因地表温度年最大值较大。温带季风气候区地表温度年最大值较高，主要地表覆盖类型为草地和农田，与森林相比草地和农田对地表温度的调节作用较差。热带、亚热带季风气候区地表温度年最大值较小，其主要地表覆盖类型为森林，植被覆盖较高，森林对地表温度的降温作用与其他地表覆盖类型相比更加强烈[8]。

2.2 地表温度年最大值年际时空变化特征

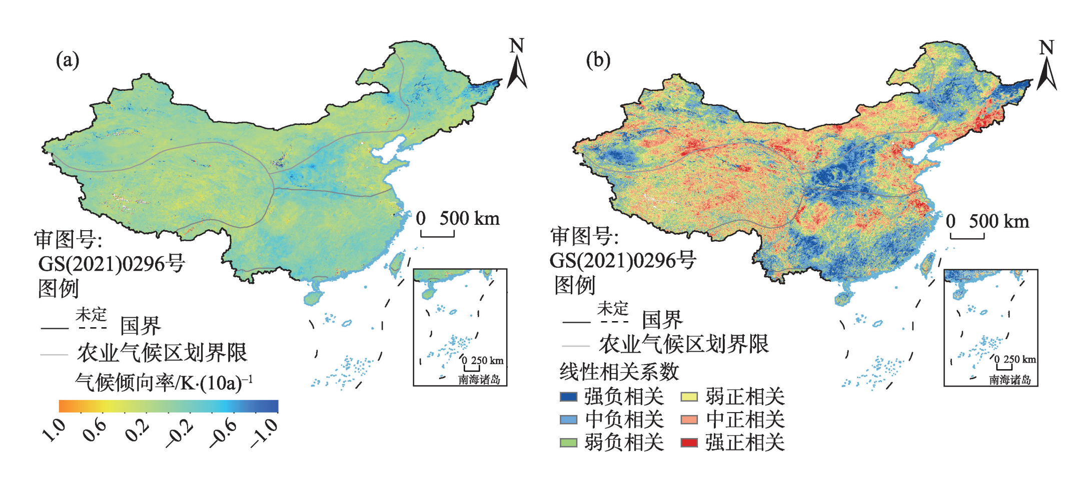
2.2.1 年际变化特征 地表温度年最大值时间序列趋势分析（气候倾向率和线性相关系数），不仅可以突出土地覆盖、NDVI对地表温度年最大值的影响，而且可以排除天气和季节变化的影响。图6显示了2003—2018年中国地表温度年最大值的气候倾向率和线性相关系数的空间分布。由图6a可知，在中国北方中部存在大规模降温，塔里木盆地边缘的绿洲、西南地区也存在降温现象。线性相关系数表现出与气候倾向率类似的空间分布趋势。在图6b中，蓝色部分为地表温度年最大值的显著降低区域，红色部分为地表温度年最大值的显著升高区域。全国49.55%区域表现为升高趋势，但是升高趋势并不



注：ENF为常绿针叶林，EBF为常绿阔叶林，DNF为落叶针叶林，DBF为常绿阔叶林，MF为混交林，CS为密封灌木林，OS为开放灌木林，WS为灌木草原，Sav为稀树大草原，Gra为草原，PW为永久湿地，Crop为农田，Urb为城市，NVM为自然植被，Ice为冰雪，Barrn为裸地，Water为水体。

图5 中国地表覆盖类型分布和各气候区的地表覆盖面积比

Fig. 5 Distribution of land cover types and land cover area ratio of each climatic zone in China



注：相关系数值0~0.2视为弱正相关，0.2~0.6视为中正相关，0.6~1视为强正相关，反之则为负相关。下同。

图6 2003—2018年中国地表温度年最大值的气候倾向率和线性相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of climatic tendency rate and linear correlation coefficient of the annual maximum surface temperature in China during 2003—2018

显著，相反在山西、陕西南部以及塔里木盆地边缘的降温趋势明显。其他研究也表明，中国中部存在降温趋势，而塔里木盆地边缘存在绿化现象。此外，西南地区也存在小部分的降温趋势，这可能与西南地区气溶胶的增加相关[23]。

2.2.2 年际变化区域分析 为进一步了解地表温度年最大值在不同区域时间变化趋势的差异性，本文在不同的气候分区对地表温度年最大值的时间序列趋势进行了统计分析。表1统计了中国在2003—2018年地表温度年最大值在不同气候区内的气候倾向率和相关系数。结果表明，青藏高原由于其特殊的地理位置表现出强烈的升温趋势。温带大陆性气候区表现出微弱升温趋势，尽管温带大陆性气候区很大部分区域呈现升温趋势，但是由于塔里木盆地边缘绿洲强烈的降温趋势，温带大陆性气候区总体升温趋势并不明显。其他区域都有不同程度的降温，其中以温带季风气候区降温最为显著，热带、亚热带季风气候区也表现出降温趋势。

线性相关系数的分析结果与气候倾向率的结果相吻合。温带大陆性气候区地表温度年最大值表现为微弱升温趋势，气候倾向率为0.09 K·$(10a)^{-1}$，而线性相关系数的显著性检验面积占比为7.20%，总体呈现升温趋势（表1）。高原山地气候区地表温度年最大值表现为升温趋势，气候倾向率为0.56 K·$(10a)^{-1}$，升温趋势较为明显，但是气候变化波动不显著，通过显著性检验面积占比仅为4.22%。温带季风气候区表现为降温趋势，气候倾向率为−0.74 K·$(10a)^{-1}$，其显著降温区占12.77%，降温趋势较为明显。亚热带季风气候区气候倾向率与温带季风气候区相比较小，降温趋势较为明显，显著降温面积占比为11.45%左右。

全国地表温度年最大值气候倾向率、线性相关系数均值表现出微弱的降温趋势（表1），降温趋势面积占全国的50.45%，这与中国中部、塔里木盆地边缘以及华南地区地表温度年最大值时间序列趋势显著降低有关。在全国尺度上，地表温度年最大值时间序列与升温趋势相比降温趋势更加显著（图6b）。

2.2.3 显著降温区与NDVI相关性分析 为了分析地表温度年最大值显著降温区与NDVI之间的相关性，本文采用MYD13A3产品中的NDVI月平均数据，计算得到NDVI年最大值。利用公式(5)计算得到NDVI年最大值时间序列的线性相关系数。图7显示了2003—2018年中国区域地表温度年最大值、NDVI年最大值线性相关系数空间分布。由图7b可知，山西、陕西南部以及塔里木盆地的植被都表现为显著增加趋势，有其他研究也表明西北地区沙漠边缘的植被增加[24]。

本文地表温度年最大值的平均值表现为降温趋势，这可能是由于部分地区强烈的降温趋势所影响，例如山西、陕西部分地区，塔里木盆地边缘以及华南地区。地表温度年最大值的降温与NDVI的增长有很大的关系，植被覆盖变化通过改变反照率、粗糙度及土壤湿度等地表属性在不同的时空尺度上对气候产生作用。一般来说，植被增加，气温降低。中国中部植被表现为明显的增长趋势，Hu[23]和Kim等[25]研究也表明中国中部地区存在明显降温现象。本研究通过地表温度年最大值、NDVI长时间序列值的分析表明了植被对地表温度年最大值的反馈作用。

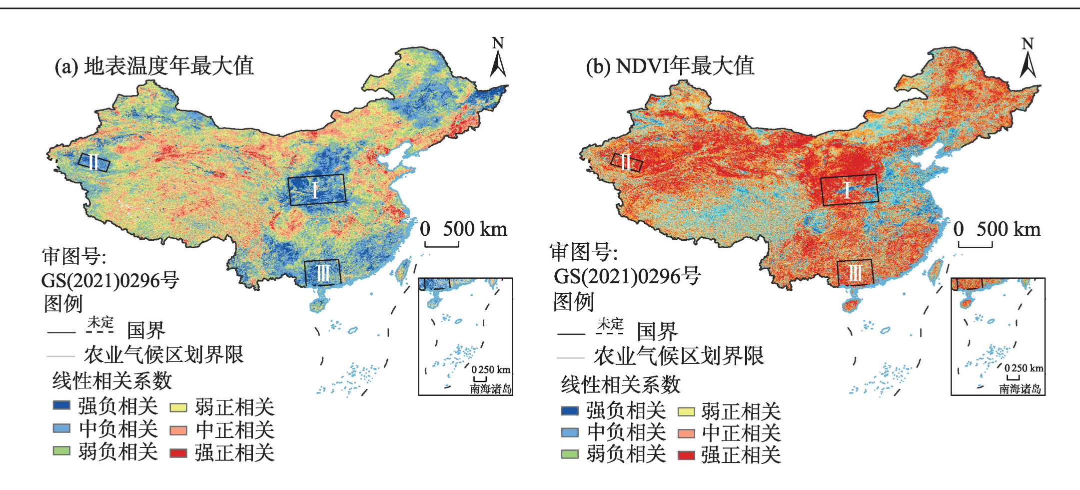
图7a显示了地表温度年最大值的3个显著降温区域（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区域）。研究该区域地表温度年最

表1 2003—2018年中国不同气候区地表温度年最大值的气候倾向率及线性相关系数

Tab. 1 Climatic tendency rate and linear correlation coefficient of annual maximum surface temperature in different climatic zones in China during 2003—2018

气候类型区	气候倾向率	线性相关系数		
	均值/K·$(10a)^{-1}$	均值	显著上升/%	显著下降/%
温带大陆性气候区	0.09	0.03	3.10	4.10
高原山地气候区	0.56	0.09	3.15	1.07
温带季风气候区	−0.74	−0.11	3.94	12.77
亚热带季风气候区	−0.55	−0.13	2.88	11.45
热带季风气候区	−0.47	−0.14	2.17	4.35
全国	−0.06	−0.02	3.22	7.95

注：直方图检验表明99.8%的气候倾向率值在−1~1之间，仅统计−1~1之间的值。



注:图a和图b中字母Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别为地表温度年最大值显著降温区、植被显著增长区。

图7 2003—2018年中国区域地表温度年最大值和NDVI年最大值线性相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of linear correlation coefficients of annual maximum surface temperature and annual maximum NDVI in China during 2003—2018

大值和NDVI年最大值之间的相关性。由表2可知，所截取的3个区域地表温度年最大值线性相关系数显著下降，同时NDVI线性相关系数显著上升，且地表温度年最大值显著上升区远大于显著下降区域，NDVI正好相反。这表明中国地表温度年最大值显著下降区域的气候变化与植被有非常强的负相关关系。将2003—2018年3个区域各年份均值作散点图(图8)，可以看出地表温度年最大值呈现明显的降温趋势，而NDVI呈现明显的增长趋势(表3)，地表温度年最大值均值与NDVI年最大值均值也呈现非常明显的负相关关系。

除华东地区外，全国很大部分地区NDVI均处于正增长趋势，而全国地表温度年最大值很大区域也处于升温趋势，这表明其他影响因素(土地利用、城市化等)对中国地表温度年最大值升高有一定影响。除上述3个区域以外，其他地区地表温度年最大值和NDVI年最大值之间的负相关关系并不明显，这表明地表温度年最大值变化影响因子仍需进一步研究。

3 结 论

本研究基于2003—2018年MODIS地表温度产品，采用气候倾向率、线性相关系数方法，分析了中国地表温度年最大值及时空变化规律，分析结果表明：

(1) 中国地表温度年最大值在西北地区的值最高。南方和北方地区地表覆盖类型的差异性使得南方地区的地表温度年最大值相比北方地区较低。中国地表温度年最大值的最高值位置位于新疆吐鲁番盆地。其原因为吐鲁番盆地地处西北，属于温带大陆性气候区，降水较少、气候干燥，并且吐鲁番盆地是中国地势最低的区域，使得这里成为中国最热的区域，是中国的热极。

(2) 中国地表温度年最大值按中国气候区划分区分析，温带大陆性气候区地表温度年最大值的值最高(均值为328.7 K)，温带季风气候区的值较高，高原山地气候区、亚热带季风气候区、热带季风气

表2 地表温度年最大值和NDVI年最大值线性相关系数

Tab. 2 Linear correlation coefficients of annual maximum land surface temperature and annual maximum NDVI

区域	NDVI线性相关系数			地表温度年最大值线性相关系数		
	均值	显著上升/%	显著下降/%	均值	显著上升/%	显著下降/%
Ⅰ	0.38	53.91	6.88	−0.41	0.23	39.83
Ⅱ	0.52	62.30	0.42	−0.42	0.02	33.20
Ⅲ	0.37	41.71	1.84	−0.37	0.05	30.16

注：字母I、II、III别为地表温度年最大值显著降温区，同图7中3个区域。下同。

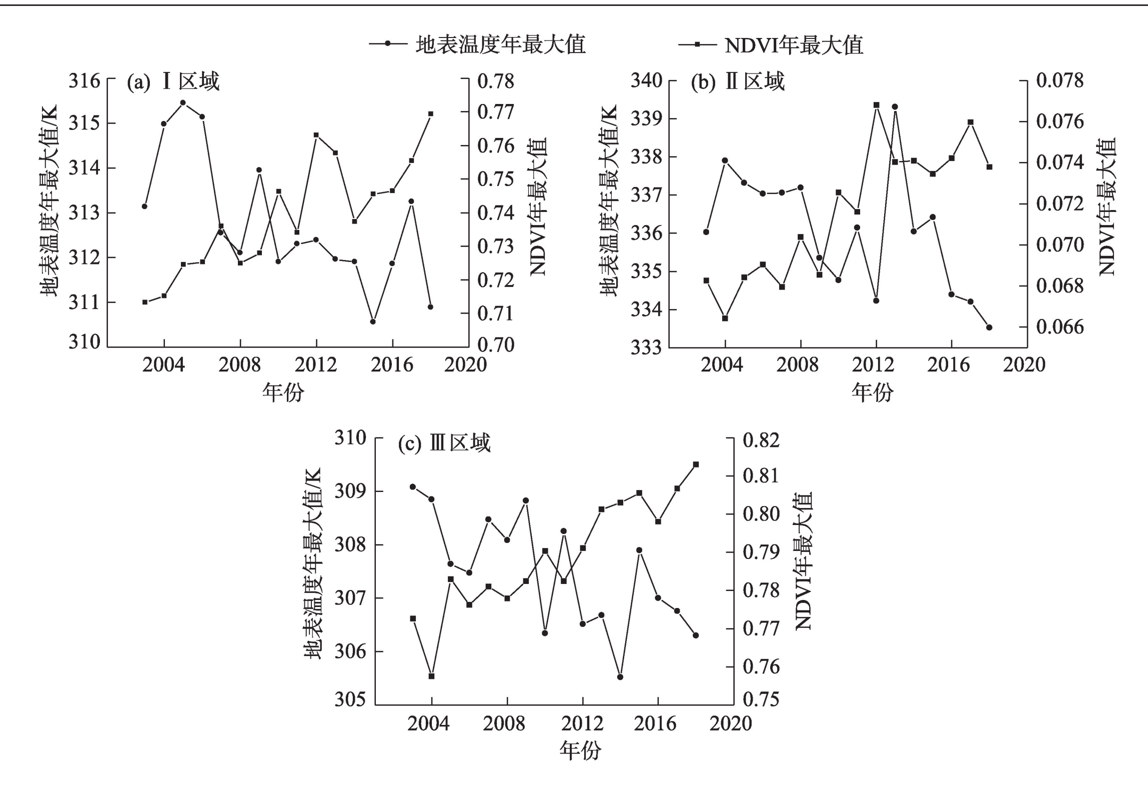


图8　2003—2018年I、II、III区域地表温度年最大值和NDVI年最大值变化

Fig. 8　Variations of annual maximum land surface temperature and annual maximum NDVI in I, II and III regions during 2003—2018

表3　地表温度年最大值和NDVI年最大值线性回归

Tab. 3　Linear regression of annual maximum land surface temperature and annual maximum NDVI

区域	NDVI年最大值			地表温度年最大值		
	$y=ax+b$	决定系数	相关系数	$y=ax+b$	决定系数	相关系数
Ⅰ	y=0.00x−5.32	0.71	0.85	y=−0.22x+744.69	0.46	−0.71
Ⅱ	y=5.81x−1.10	0.73	0.87	y=−0.18x+696.70	0.25	−0.54
Ⅲ	y=0.00x−5.02	0.84	0.92	y=−0.15x+617.40	0.43	−0.68

候区的值都较低。地表温度年最大值的空间分布与地表覆盖类型有很大关系，不同地表覆盖类型对地表温度年最大值具有不同程度的影响。

（3）中国地表温度年最大值长时间序列分析整体表现为微弱降温趋势，全国地表温度气候倾向率均值为−0.06 K·(10a)$^{-1}$。对中国地表温度年最大值长时间序列趋势进行分区分析表明，中国温带大陆性气候区地表温度年最大值长时间序列呈现微弱升温趋势，高原山地气候区的升温趋势更加强烈，气候倾向率均值为0.56 K·(10a)$^{-1}$，高原对气候变化的放大作用显著，热带季风气候区温带季风气候区、亚热带季风气候区线性相关系数均表现为降温趋势。对全国来说地表温度年最大值的显著降温趋势与显著增温趋势相比更加明显，这主要是由于中国中部、华南以及西北塔里木盆地边缘出现显著的降温趋势。研究表明中国中部、华南以及西北塔里木盆地边缘出现显著的降温趋势与植被增长有很大关系。

（4）除了华东地区，全国的NDVI均处于正增长，其中以显著降温区域的NDVI增长最为明显，而地表温度年最大值时间序列弱正相关区域的NDVI也表现为正相关，其地表温度年最大值增长因素需要进一步研究。

此研究具有其他地表温度年最大值研究所没有的长时间序列研究，而其他长时间序列研究中均为地表温度日、月或年均值，前人研究中并没有对中国地表温度年最大值进行长时间序列分析。地表温度最大值排除了天气影响，且与地表温度均值所关注的现实意义并不相同，前者与地表覆盖、干旱、热浪等重大土地利用变化相关。本研究中地表

温度年最大值与地表覆盖变化表现出强相关性，表明地表温度年最大值的变化与近些年植树造林工程息息相关，但是植树造林对地表温度变化定量研究仍需进一步研究，除此之外存在部分植被与地表温度年最大值均增长的现象，表明除植被变化外其他土地利用的变化也对地表温度年最大值有一定影响，需进一步研究。

参考文献(References)

[1] 邱丽莎, 何毅, 张立峰, 等. 祁连山MODIS LST时空变化特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 762-737. [Qiu lisha, He Yi, Zhang Lifeng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influence factors of MODIS LST in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 762-737.]

[2] Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 25(1): 261-274.

[3] Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131(131): 14-37.

[4] Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global temperature change[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2006, 103(39): 14288-14293.

[5] Mao K B, Ma Y, Tan X L, et al. Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(2): 503-512.

[6] Susskind J, Schmidt G A, Lee J N, et al. Recent global warming as confirmed by AIRS[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14 (4): 044030, doi: 10.1088/1748-9326/aafd4e.

[7] Wang L, Henderson M, Liu B H, et al. Maximum and minimum soil surface temperature trends over China, 1965—2014[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 2004-2016.

[8] Mildrexler D J, Zhao M S, Running S W. A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2011, 116(G3): G03025, doi: 10.1029/ 2010JG001486.

[9] Daly C, Halbleib M, Smith J I, et al. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(15): 2031-2064.

[10] Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(1): 83-98.

[11] 孙灏, 马立茹, 蔡创创, 等. 干旱区地表温度和热岛效应演变研究——以宁夏沿黄城市带为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(9): 694-705. [Sun Hao, Ma Liru, Cai Chuangchuang, et al. Evolution of surface and heat island effect in arid areas: A case of city belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(9): 694-705.]

[12] Mcmillin M L. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(36): 5113-5117.

[13] Duan S B, Li Z L, Wang C G, et al. Land-surface temperature retrieval from Landsat 8 single-channel thermal infrared data in combination with NCEP reanalysis data and ASTER GED product[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 40(5-6): 1763-1778.

[14] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.

[15] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35 (4): 980-996.

[16] Mildrexler D J, Zhao M, Cohen W B, et al. Thermal anomalies detect critical global land surface changes[J]. Journal of Applifd Meteorology and Climatology, 2018, 57(2): 391-411.

[17] Friedl M A, Davis F W. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(1): 1-17.

[18] Nemani R R, Running S W, Pielke R A, et al. Global vegetation cover changes from coarse resolution satellite data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101(D3): 7157-7162.

[19] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 369-393.

[20] Prata A J, Caselles V, Coll C, et al. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects[J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 12(3): 175-224.

[21] 程清平, 王平, 谭小爱. 1961—2013年贵州省地面温度时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 122-131. [Cheng Qingping, Wang Ping, Tan Xiaoai. Temporal and variation characteristics of surface temperature in Guizhou during 1961—2013[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 122-131.]

[22] 古丽吉米丽·艾尼, 迪丽努尔·阿吉, 古丽巴哈尔·吾布力. 全球气候变化对东疆地区的影响分析——以吐鲁番盆地为例[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 70-75. [Aini Guljamila, Aji Dilnur, Ubul Gulbahar. Analysis of the effect of global climate change on east Xinjiang region (Turpan Basin as an example)[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Sciences Edition), 2011, 32(3): 70-75.]

[23] Hu Z Z. Long-term climate variations in China and global warming signals[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D19): 4614, doi: 10.1029/2003JD003651.

[24] Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China[J]. Climatic Change, 2006, 80(3-4): 379-393.

[25] Kim H S, Chung Y S, Tans P P, et al. Climatological variability of air temperature and precipitation observed in South Korea for the last 50 years[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, 9(6): 645-651.

Spatio-temporal distribution and variation characteristics of annual maximum land surface temperature in China during 2003—2018

WANG Liping[1,2], DUAN Sibo[2], ZHANG Xiaoyu[1], YU Yanru[2]

(1. School of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Land surface temperature (LST) is a very important environmental factor that impacts the energy and water exchange between the atmosphere and ecosystems. Research on China's climate change in the context of global climate change is of great significance for global and Chinese food security as well as the sustained and stable development of the social economy. Compared with surface temperature data obtained via thermal infrared remote sensing, information regarding the maximum surface temperature is of increased significance as it removes the influence of clouds and rain. The annual variation of the maximum surface temperature is relatively stable; however, it is highly sensitive to changes in land use, drought, and heat waves. This study uses moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) surface temperature data and normalized difference vegetation index (NDVI) data to obtain the annual maximum surface temperature using the maximum value synthesis method. On the basis of the MODIS LST data from 2003 to 2018, the temporal and spatial distribution and variation characteristics of annual LST maxima in China were analyzed using techniques including the climate trend rate and linear correlation coefficient, and regional analyses were conducted according to the agricultural climate regionalization of China. The correlation between the annual maximum change of the LST and land cover types in China is established. The correlation between the annual maximum LST and the maximum NDVI in the regions with significant trend changes is studied, and the factors that influence the annual maximum LST change in China are investigated. The results obtained indicate the following: (1) The annual maximum value of China's surface temperature presents a higher spatial distribution characteristic in the north and lower in the south; its highest value was observed in the Turpan Basin of Xinjiang. (2) According to the analysis of the spatial distribution of the annual maximum surface temperature in China's climate zoning, the annual maximum surface temperature is the highest in the temperate continental climate zone, with an average of 325.39 K over 16 years. The second hottest region is the temperate monsoon climate zone, where the average annual maximum surface temperature over 16 years is 312.84 K. The plateau mountain, subtropical monsoon, and tropical monsoon climate zones have lower values of annual maximum surface temperature. The spatial distribution pattern of the annual maximum surface temperature is related to the type of surface cover. (3) During the period of 2003—2018, the temporal variation of the annual maximum surface temperature in China showed a slight cooling trend, with a climate tendency rate of $-0.06\ K\cdot(10a)^{-1}$; the area in which a cooling trend was observed accounted for 50.45% of the country's total area. (4) The climate tendency rate of the annual maximum surface temperature and the linear correlation coefficient are high in the west and low in the east, and the warming trend in the west is clearer than that in the east. Some areas showed a significant cooling trend; these areas included central northern China, southern China, and the edge of the Tarim Basin. The cooling in these areas is related to changes in the vegetation cover. The maximum surface temperature contains a large amount of geographic information, which reflects the impact of human activities on the geographic environment and provides theoretical support for decisions related to transforming the geographic environment.

Key words: annual maximum surface temperature; time series; temporal and spatial variation; MODIS data